



Executive Summary, 6 avril 2016

GIVRAGE À ST. BRAIS ET AU MONT CROSIN

Effets du givrage sur l'exploitation et la
production énergétique d'éoliennes dans l'arc
Jurassien

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche Énergie éolienne
CH-3003 Berne
www.bfe.admin.ch

Mandataire:

Genossenschaft Meteotest
Fabrikstrasse 14
CH-3012 Berne
www.meteotest.ch

Auteurs:

René Cattin, Meteotest, rene.cattin@meteotest.ch
Sara Koller, Meteotest, sara.koller@meteotest.ch
Ulla Heikkilä, Meteotest, ulla.heikkila@meteotest.ch

OFEN – directrice de section: Dr. Katja Maus
OFEN – directeur du programme: Robert Horbaty / Lionel Perret
OFEN – contrat - no. de projet: 154227 / 103208 bzw. 154232 / 103203
TP 8100088, REF-1081-00229, SI/500692-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du rapport.

Index

1	Buts du projet	4
2	Installations.....	5
3	Conditions de givrage.....	5
3.1	Fréquence de givrage	5
3.2	Conditions de vent pendant la formation de glace	8
4	Détection de glace.....	9
4.1	Courbe de puissance	9
4.2	Température et humidité relative.....	9
4.3	Système de surveillance des pâles de MOOG/Insensys	10
5	Performance du chauffage des pâles.....	11
5.1	Chauffage à l'arrêt	11
5.2	Chauffage pendant l'exploitation	12
5.3	Chauffage préventif	12
6	Chute/jet de glace.....	12

1 Buts du projet

Dans le cadre du programme de recherche "Énergie éolienne" de l'OFEN, des projets ont été menés à St. Brais (2009 à 2015) et au Mont Crosin (2014 à 2015) en poursuivant les buts suivants:

- Installation de webcams pour la **surveillance des conditions de givrage** sur la nacelle et les pâles du rotor d'éoliennes. Elargissement de la surveillance au site du Mont Crosin.
- Détermination de la **fréquence des évènements de givrage** aux sites de St. Brais et du Mont Crosin, de même que des conditions de vent et de température typiquement associées au givrage. Ajout des résultats de Gütsch et comparaison. Comparaison avec la carte du givrage en Suisse.
- Evaluation de différentes **méthodes de détection de glace** sur les pâles d'éoliennes du site de St. Brais:
 - comparaison de la courbe de puissance et de la production effective
 - température et humidité relative
 - système de surveillance des pâles de Moog/Insensys
- Détermination de l'efficacité du **chauffage de pâles d'ENERCON** à l'aide de l'analyse d'images webcam pour St.Brais: calcul de la consommation énergétique requise, de l'efficacité à supprimer la glace, analyse coûts-avantages, comparaison de différents modes de chauffage des pâles, calcul de pertes de production avec et sans système de chauffage des pâles.
- Etudes de terrain pour le **recensement de morceaux de glace éjectés** aux sites de St. Brais et du Mont Crosin. Comparaison avec les résultats de l'étude de Gütsch.

2 Installations

Les pâles du rotor et les capteurs sur la nacelle ont été surveillés par webcam. Pour ce faire, une caméra réseau Mobotix M12 avec dual optic a été installée en 2009 sur une éolienne à St. Brais. La deuxième éolienne à St. Brais a également été équipée de caméras en 2012. En 2014 des caméras ont été installées sur une éolienne du parc du Mont Crosin. La Figure 1 montre les installations sur une des éoliennes de St. Brais.

En 2010, une éolienne de St. Brais a été équipée de capteurs de température et d'humidité relative. En 2009 l'éolienne WEA 1 qui allait être installée à St. Brais a été équipée du système Moog/Insensys de détection de glace sur les pâles à la fabrique Enercon de Aurich, en Allemagne.



Figure 1: Caméras et projecteur-IR installés sur la nacelle d'une éolienne de St. Brais. Gauche: caméra dirigée vers les pâles. Droite: caméra dirigée vers les capteurs.

3 Conditions de givrage

3.1 Fréquence de givrage

Le givrage d'installations peut être décrit avec les termes suivants:

- **Givrage Météorologique** (meteorological Icing): période pendant laquelle les conditions météorologiques sont propices au dépôt de glace. C'est la période pendant laquelle la glace se forme.
- **Givrage instrumental** (Instrumental Icing): Période de dérangement technique d'un instrument ou d'une éolienne dû au givrage. C'est la période pendant laquelle de la glace est présente sur un instrument ou une éolienne.
- **Période d'incubation** (incubation time): Délai entre le début du givrage météorologique et le début du givrage instrumental.
- **Phase de rétablissement** (recovery time): Délai entre la fin du givrage météorologique et le retour à un fonctionnement normal d'un instrument ou d'une éolienne.

La Figure 2 illustre les définitions ci-dessus pour l'exemple d'une mesure du vent.

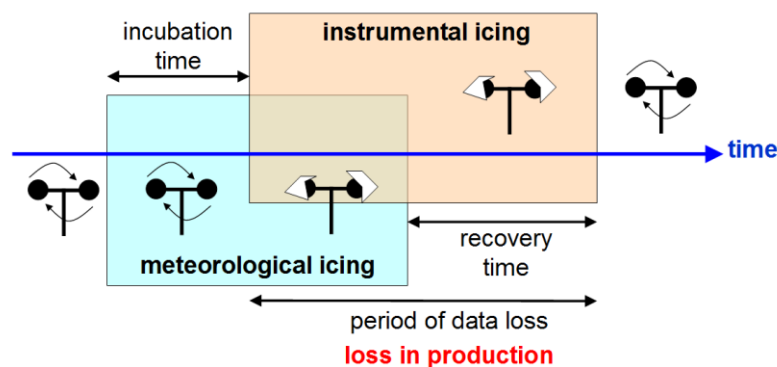


Figure 2: Description du givrage d'installations par les termes "givrage météorologique", "givrage instrumental", "phase d'incubation" et "phase de rétablissement".

Pour obtenir des informations sur la fréquence du givrage météorologique et instrumental, les images des webcams dirigées contre les capteurs ont été analysées manuellement. Comme approximation, le début du givrage météorologique et du givrage instrumental a été défini par l'apparition de glace sur les capteurs. La période d'incubation a donc été définie comme nulle. La période pendant laquelle un accroissement de la quantité de glace a pu être observé, a été définie comme la période de givrage météorologique. Le moment à partir duquel plus aucun dépôt de glace n'a pu être observé sur les capteurs a été défini comme fin de la période de givrage instrumental.

Le Tableau 1 et la Figure 3 présentent une vue d'ensemble des résultats.

Tableau 1: Vue d'ensemble des événements de givrage à Saint Brais, à Gütsch et au Mont Crosin.

	Givrage météo- rologique	Givrage instru- mental
Gütsch 2009/10	130h / 5.4 jours	674h / 28.1 jours
St. Brais 2009/10	276h / 11.5 jours	997h / 41.5 jours
St. Brais 2010/11	247h / 10.3 jours	853h / 35.5 jours
St. Brais 2011/12	96h / 4 jours	454h / 19 jours
St. Brais 2012/13	538h / 22.3 jours	1'610h / 67.1 jours
St. Brais 2013/14	285h / 11.9 jours	868h / 36.2 jours
St. Brais 2014/15	199 h / 8.3 jours	1'449h / 60 jours
Mont Crosin 2014/15	122h / 5.2 jours	1'389h / 57.9 jours

L'analyse de la fréquence de givrage aux différents sites montre clairement que la durée des événements de givrage météorologique (formation de glace) est relativement courte par rapport à la durée des événements de givrage instrumental (persistance de la glace). Cette différence est centrale pour déterminer l'utilité d'un éventuel système de chauffage des pâles. Un tel système permet en effet de faire fondre la glace dès la fin du givrage météorologique et donc une reprise plus rapide du fonctionnement normal de l'éolienne (avant la fin du givrage instrumental).

La moyenne du givrage météorologique sur six hivers à St. Brais se monte à 274h (6 jours, 3% de l'année). Cette valeur est relativement proche de celle de la carte du givrage en suisse sur www.wind-data.ch qui donne 9 jours de givrage météorologique par an à 100 m

du sol à cet endroit. La moyenne du givrage instrumental sur les six hivers est de 1'038h (43 jours par hiver, 11.8% de l'année)

La fréquence de givrage varie fortement entre les différents hivers. Seulement 96h de givrage météorologique ont été recensées pendant l'hiver 2011/2012 alors que l'hiver d'après, en 2012/2013, le givrage météorologique a duré 538h (cinq fois plus longtemps, voir aussi la Figure 3). Ceci montre que la mesure du givrage pendant un hiver ne suffit pas à estimer les pertes dues au givrage pour un parc éolien en planification.

Sur la base des fréquences moyennes de givrage, le site de St. Brais se trouve dans la classe de givrage IEA 3¹ avec une perte de production de de 3-12%, selon l'équipement et le mode de fonctionnement des éoliennes.

Tableau 2: Classification IEA de sites d'implantations d'éoliennes en fonction de la fréquence de givrage.

classe de givrage IEA	Givrage météorologique [% de l'année]	Givrage instrumental [% de l'année]	Perte de production [% de la production annuelle]
5	>10	>20	>20
4	5-10	10-30	10-25
3	3-5	6-15	3-12
2	0.5-3	1-9	0.5-5
1	0-0.5	0-1.5	0-0.5

La comparaison avec le site de Gütsch montre que le climat de givrage est très différent entre le Jura et les hautes Alpes. Le givrage à Gütsch commence environ 1 mois plus tôt en automne et se termine environ 1-2 mois plus tard au printemps. Les périodes de givrage météorologique y sont plus courtes que dans le Jura. Le givrage instrumental y dure par contre plus longtemps.

Les conditions de givrage pour les deux sites de l'Arc jurassien à St. Brais et au Mont Crosin sont relativement semblables pour l'hiver 2014/15 avec 8.3, resp. 5.2 jours de givrage météorologique et environ 60 jours de givrage instrumental.

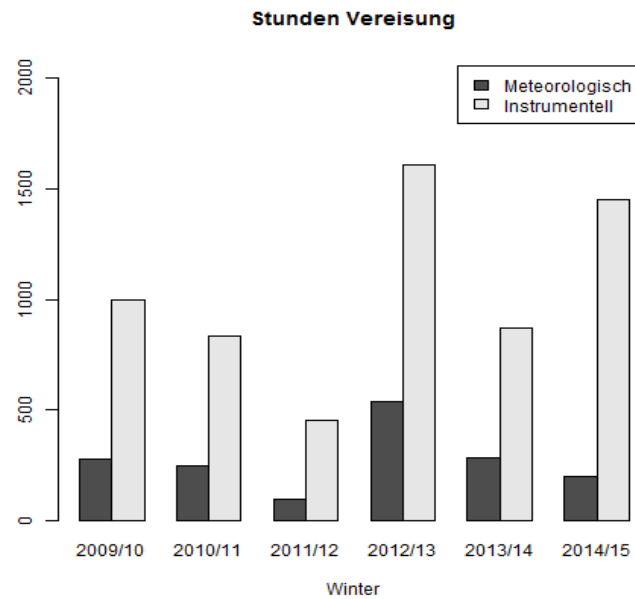


Figure 3: Nombre total d'heures de givrage météorologique et instrumental pour chacun des six hivers de mesure au parc éolien de St. Brais.

3.2 Conditions de vent pendant la formation de glace

La Figure 4 montre la distribution du givrage météorologique en fonction des conditions de vent locales. Pendant l'hiver 2009/10 le givrage météorologique a eu lieu principalement en association avec un vent de secteur nord-est et une vitesse comprise entre 3 et 5.5 m/s. Aucun givrage météorologique n'a eu lieu au-dessus de 12 m/s. Dans de rares cas, le givrage météorologique a eu lieu alors que le vent soufflait de secteur ouest-sud-ouest à ouest-nord-ouest. Cette distribution a été confirmée pour les autres hivers.

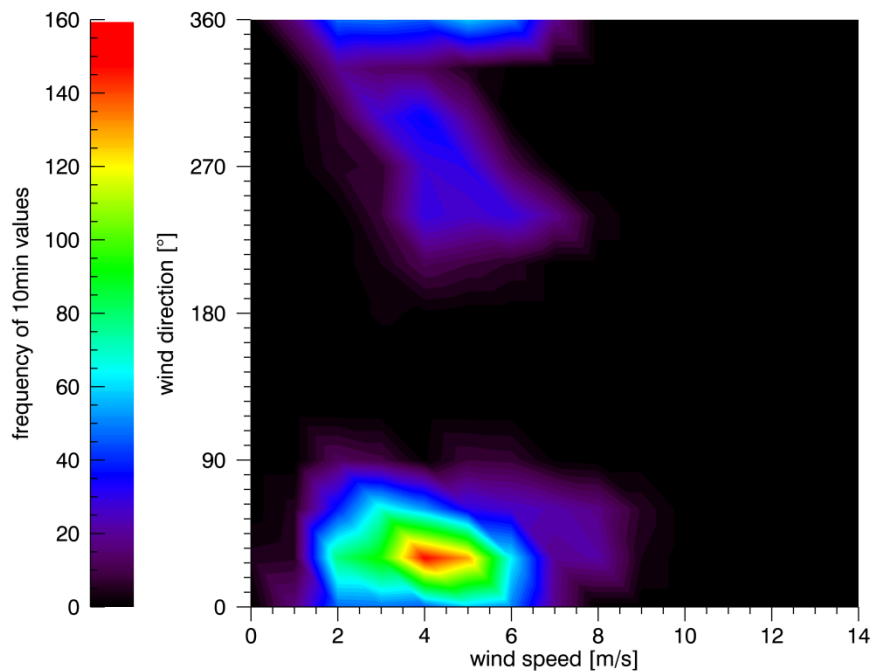


Figure 4: Distribution de la fréquence de givrage météorologique en fonction de la vitesse et de la direction du vent.

4 Détection de glace

4.1 Courbe de puissance

L'analyse du système de détection de glace de série des éoliennes ENERCON (basé sur la comparaison de la production effective avec la production calculée selon la courbe de puissance) a montré que ce système est en mesure de détecter tous les événements de givrage observés entre décembre 2009 et mai 2011. Les événements de givrage ont été déterminés sur la base des images webcam.

4.2 Température et humidité relative

ENERCON a installé un instrument de mesure de l'humidité relative et de la température sur la nacelle de l'éolienne 1. Les données ainsi collectées pour les hivers de 2009/10 et 2010/11 ont été analysées.

La Figure 5 montre un diagramme de dispersion de la température en fonction de l'humidité relative. Il est à noter qu'une saturation n'est jamais atteinte par des températures inférieures à -7°C . La raison en est une directive de l'Organisation météorologique mondiale OMM qui stipule que la mesure de l'humidité relative doit toujours être définie par la saturation en vapeur d'eau par rapport à l'eau liquide². Cette procédure n'est pas parfaitement correcte pour des températures en-dessous de zéro degrés car la saturation en vapeur d'eau par rapport à la glace est inférieure à celle rapportée à l'eau liquide. Ainsi, une valeur de 100% ne peut plus être atteinte en-dessous du point de givrage.

Les valeurs correspondant aux événements de givrage sont montrées en rose dans la Figure 5. Pendant l'hiver 2009/10 au site de St. Brais, le givrage a eu lieu par une température comprise entre 0 et -13°C et une humidité relative comprise entre 90 et 100%.

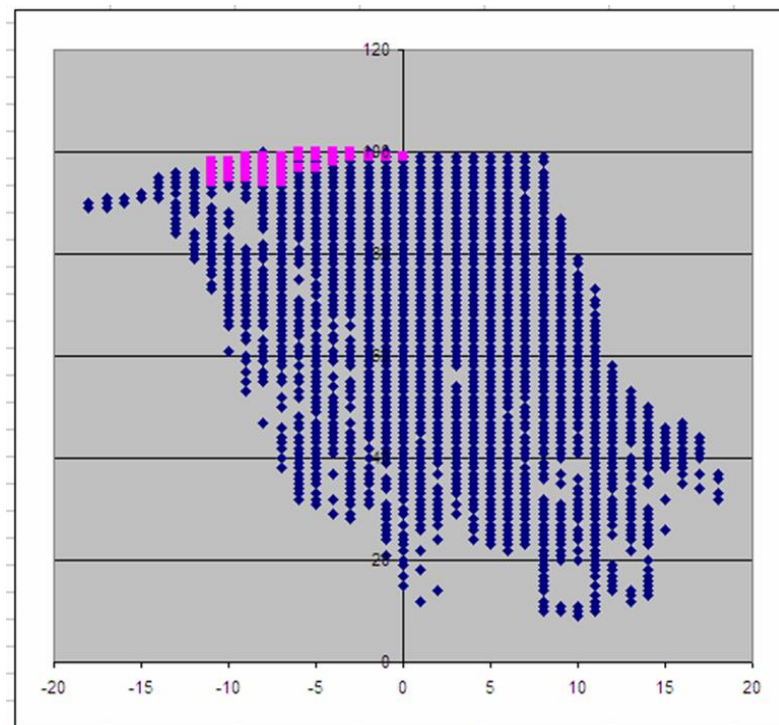


Figure 5: Bleu: relation entre la température et l'humidité relative au site de St. Brais pendant l'hiver 2009/10. Pour des températures en-dessous d'environ -7°C , une saturation de 100% ne peut plus être atteinte. En rose: les valeurs qui correspondent aux événements de givrage.

²

WMO/CIMO: Guide to Meteorological Instruments Observation, Chapter 4, Annex 4.A, Item 17

Une supposition fréquente est que le givrage a lieu par des températures inférieures au point de givrage et par une humidité relative supérieure à 97%. La Figure 6 montre, dans la ligne du bas, les périodes pendant lesquelles ces conditions ont été remplies.

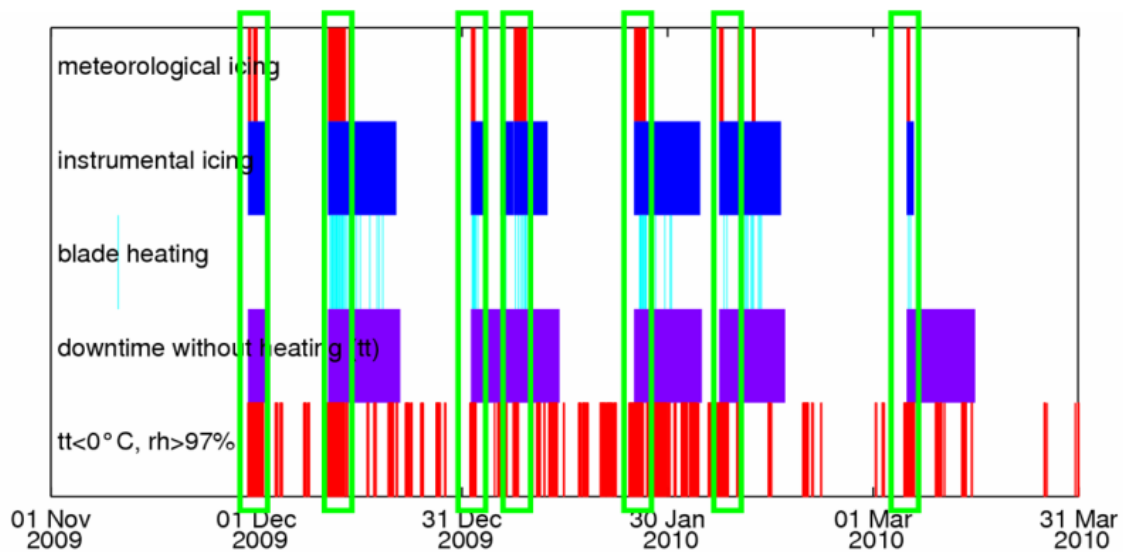


Figure 6: Périodes pendant lesquelles la température de l'air a été inférieure au point de givrage et l'humidité relative supérieure à 97% (ligne du bas). Ces périodes sont comparées au givrage météorologique et instrumental observés. Les boîtes vertes marquent les périodes de givrage météorologique.

Il n'existe pas de relation directe entre ces périodes et les périodes de givrage effectif. Les conditions sont souvent remplies sans que de la glace ne se forme. Ainsi, une combinaison de mesures de température et d'humidité relative ne peut pas être utilisée comme système de détection de glace en raison d'une trop grande probabilité de fausses alarmes.

4.3 Système de surveillance des pâles de MOOG/Insensys

Le système de surveillance des pâles de MOOG/Insensys donne des résultats généralement positifs pour la détection de glace (Figure 7). Il s'est cependant avéré clair que le système est difficilement utilisable sans accès aux données de fonctionnement de l'éolienne, particulièrement les données du pitch. Comme ces données n'étaient pas disponibles pour le projet, l'analyse du système n'a pas pu être approfondie. Entre-temps MOOG/Insensys a cessé la production de son système de détection de glace.

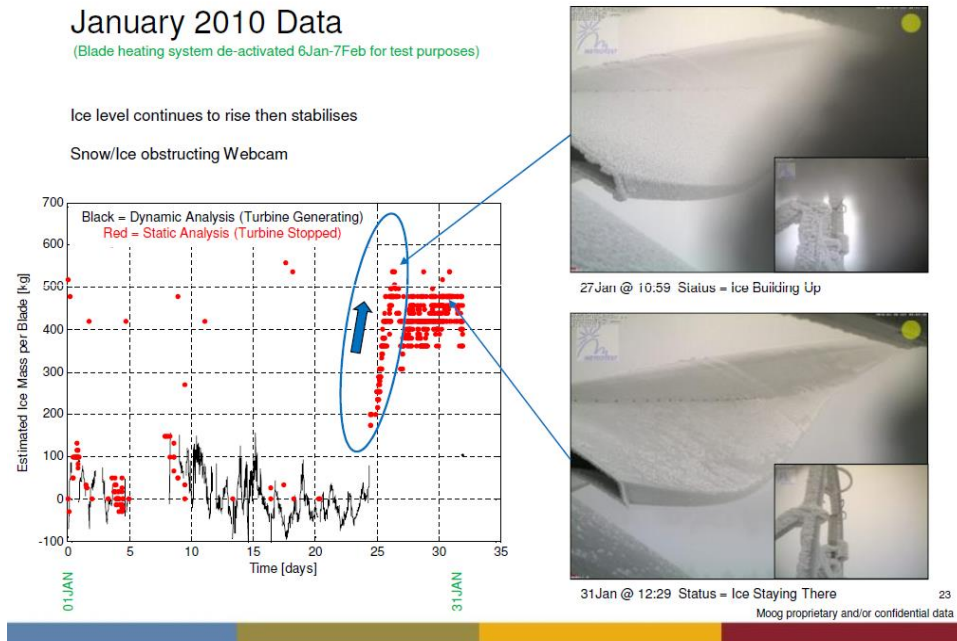


Figure 7: Formation de glace enregistrée par le système de surveillance des pâles MOOG/Insensys pendant un événement de givrage à la fin janvier 2010.

5 Performance du chauffage des pâles

5.1 Chauffage à l'arrêt

Le chauffage des pâles des éoliennes de St. Brais pendant l'hiver 2009/10 a été opéré comme suit: chaque éolienne a été arrêtée automatiquement dès que de la glace y a été détectée. Les pâles ont ensuite été chauffées pendant 3 heures avant que l'éolienne ne soit réenclenchée automatiquement.

Au total le chauffage des pâles a été activé 124 fois pendant l'hiver 2009/10 sur les deux éoliennes. L'énergie consommée pour le chauffage équivaut à environ 0.5% de la production annuelle budgétisée des deux éoliennes. Le chauffage des pâles a été actif principalement pendant les périodes de givrage météorologique. Dès que la glace a arrêté de se former, le chauffage des pâles n'a plus dû être activé à part dans de rares cas isolés où des restes de glace ont dû être retirés.

En assumant que, sans système de chauffage des pâles, une éolienne doit être arrêtée pendant l'entier des périodes de givrage instrumental, la période totale d'arrêt due au givrage a pu être réduite par au moins un facteur 4 à St. Brais grâce au système de chauffage. Ceci représente un gain de production de 6% par rapport à la production annuelle budgétisée des deux éoliennes. D'un autre côté, l'arrêt des deux éoliennes pendant les périodes de chauffage (environ 7.5 jours par éolienne) est lié à une perte de production qui reste non négligeable et qui se monte à environ 3% de la production annuelle budgétisée.

Le chauffage des pâles a été désactivé entre le 6 janvier et le 8 février 2010 sur l'éolienne 1 alors qu'il a été maintenu sur l'éolienne 2. Une comparaison des deux éoliennes pendant cette période permet de quantifier l'énergie supplémentaire récoltée ainsi que l'énergie utilisée par le système de chauffage des pâles et d'ainsi évaluer le rapport coûts/avantages du système. Trois événements de givrage ont eu lieu pendant la période considérée. Le Tableau 3 montre le début et la fin de chaque événement ainsi que le gain de production de l'éolienne 2 pendant cette période. La comparaison des totaux d'énergie montre que l'énergie utilisée pour le chauffage équivaut à seulement environ 6.5% de l'énergie gagnée.

Tableau 3: Energie de chauffage comparée au gain de production lié à l'utilisation du système de chauffage des pâles.

Début de l'évènement de givrage	Fin de l'évènement de givrage	Production de l'éolienne 2 [kWh]
6. jan. 2010 18:48	7. jan. 2010 16:30	3'892
25. jan. 2010 20:01	2. fév. 2010 18:41	96'608
7. fév. 2010 11:35	8. fév. 2010 20:27	2'993
Gain de production de l'éolienne 2		103'493
Energie utilisée par le système de chauffage de pâles		-7'020
Gain de production total de l'éolienne 2		96'473

5.2 Chauffage pendant l'exploitation

Pendant l'hiver 2010/11, le mode de chauffage d'une éolienne a été changé de manière à chauffer l'éolienne pendant l'exploitation. Avec ce système, le chauffage se met en marche dès que l'éolienne détecte de la glace via une baisse de rendement. Un seuil de tolérance plus faible est utilisé que dans le cas du chauffage à l'arrêt. La fin de la phase de chauffage est déterminée par la courbe de puissance et par différents paramètres météorologiques. Dans le cas où le chauffage en exploitation ne suffit pas à réduire suffisamment la perte de puissance, l'éolienne est arrêtée puis chauffée à l'arrêt.

L'analyse des données a montré que dans trois des quatre cas, le chauffage en exploitation a permis d'atteindre une production plus importante que le chauffage à l'arrêt. Le gain de production se situant aux alentours de 10% à 30%. Le gain de production dépend de la force du vent pendant les périodes de chauffage en exploitation ainsi que de la durée de ces périodes. Dans les trois cas, les pâles du rotor ont été chauffées pendant une période de givrage météorologique relativement longue. Au moment de la finalisation du projet, le système de chauffage en exploitation est utilisé pour les deux éoliennes de St. Brais.

5.3 Chauffage préventif

Pendant l'hiver 2011/12, une éolienne de St. Brais a été exploitée selon le système de "chauffage préventif". L'éolienne a été chauffée pendant l'exploitation et les périodes de chauffage ont été déterminées sur la base de mesures de température et d'humidité relative. Pendant les périodes de fort givrage, la turbine a été arrêtée et chauffée à l'arrêt.

L'analyse des données a montré la température et l'humidité relative ne sont pas de bons indicateurs pour le lancement d'une période de chauffage et ont donné lieu à de fréquentes phases de chauffage inutiles (perte d'énergie). Cette méthode a donc été abandonnée.

6 Chute/jet de glace

Dès que de la glace se forme sur les pâles d'une éolienne, il existe un risque qu'elle se détache, c.-à-d. qu'elle tombe d'une éolienne à l'arrêt ou soit éjectée d'une éolienne en mouvement. La chute et le jet de glace constituent un danger pour les passants et pour le personnel de service. Ce danger potentiel doit ainsi être pris en compte lors de la planification et lors de l'exploitation d'éoliennes sous conditions givrantes.

Une étude des jets de glace a été effectuée pour les deux éoliennes de St. Brais entre 2011 et 2015. L'étude a été étendue au parc du Mont Crosin pendant l'hiver 2014/15.

Les résultats du projet "Alpine Test Site Gütsch" ont également été intégrés de manière à permettre une comparaison avec l'étude des jets de glace au site de Gütsch entre 2005 et 2009.

Il s'est agi de déterminer la fréquence des évènements de givrage, la distance à laquelle les morceaux ont été éjectés et le poids et les dimensions des morceaux. Les différences entre

les turbines ont aussi été notées. Des interventions de terrain ont été effectuées lorsque les images des webcams ont montré des dépôts de glace sur les capteurs ou sur les pâles des rotors. Pour ce faire, les images webcams ont été téléchargées et contrôlées chaque jour. Plus de 1'000 morceaux de glace ont été recensés sur toutes les études cumulées. Il n'a pas été possible de distinguer la chute de glace (éolienne arrêtée) du jet de glace (éolienne en mouvement).

L'analyse des données de St. Brais (Enercon E-82, hauteur de moyeu de 78 m) pour les hivers 2012/13 et 2014/15, de Gütsch (Enercon E-40, hauteur de moyeu de 50 m) entre 2005 et 2009 et du Mont Crosin (Vestas V90, hauteur de moyeu de 95 m) pour l'hiver de 2014/15 ont montré que de la glace a été éjectée aux trois endroits.

La Figure 8 montre la distribution des distances mesurées entre les morceaux de glace trouvés et le pied des éoliennes. Les distances ont été normalisées par la hauteur de la pointe des pâles (hauteur de moyeu plus diamètre du rotor). La distribution cumulée est également visible. La Figure 8 montre que les morceaux sont les plus fréquents à une distance équivalant à 0.2-0.4 fois la hauteur de la pointe des pâles. Les trois quarts des morceaux ont été trouvés à une distance équivalant entre 0 et 0.6 fois la hauteur de la pointe des pâles. Aucun morceaux n'a été trouvé à plus de 1.4 fois la hauteur de la pointe des pâles. Il ne peut cependant pas en être déduit qu'aucun morceau ne puisse atteindre une distance supérieure. Etant donné le grand nombre de morceaux recensés, la probabilité que des morceaux atteignent des distances supérieures peut néanmoins être considérée comme faible.

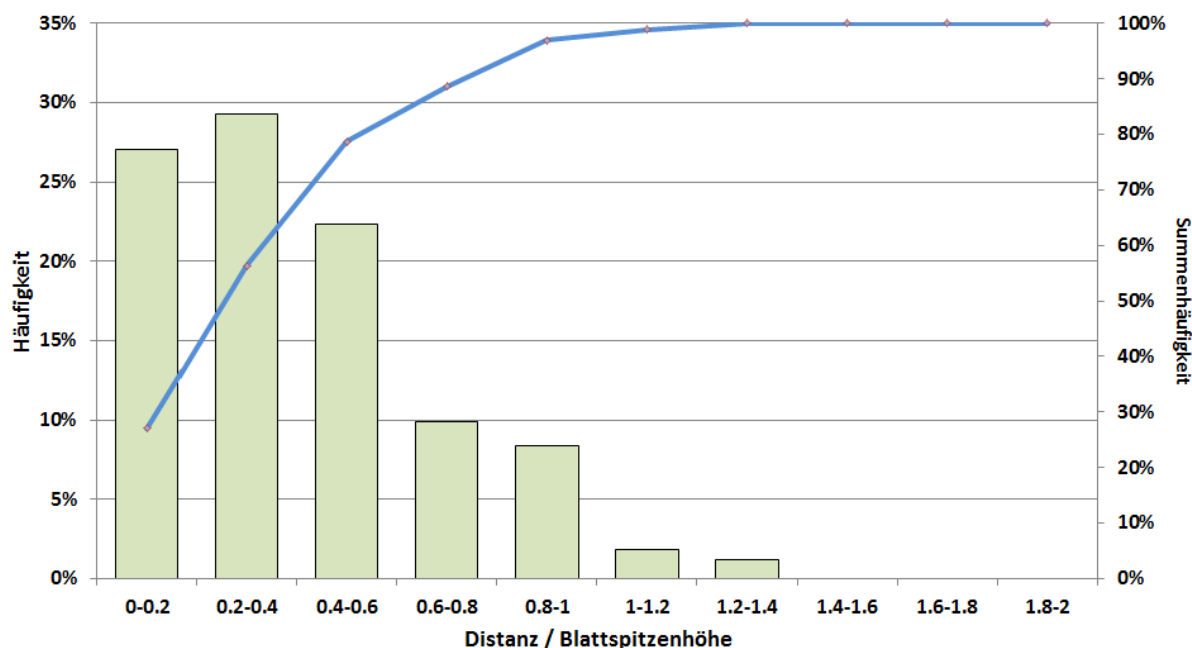


Figure 8: Distribution de la fréquence des distances entre les morceaux trouvés et le pied des éoliennes (à Gütsch, St. Brais, Mont Crosin). Les distances sont normalisées par la hauteur de la pointe des pâles des éoliennes respectives.

L'analyse montre une augmentation de la fréquence des morceaux de glace jusqu'à une distance équivalant à la hauteur de la pointe des pâles. Au-delà, cette fréquence diminue rapidement. Lors de la planification et de l'exploitation d'un parc éolien sous des conditions givrantes, le risque lié au jet de glace doit être évalué dans chaque cas et la disposition du parc (emplacements des éoliennes) doit tenir compte d'un concept de minimisation des risques.

Le rayon de danger définit par la formule de Seifert³ de $1.5 \times (\text{diamètre du rotor} + \text{hauteur de moyeu})$ équivaut pour les trois sites étudiés à 1.9-2.0 fois la hauteur de la pointe des pâles. Lors des interventions de terrain, aucun morceau n'a été trouvé à pareille distance. Suite aux études de terrain, des mesures de minimisation des risques ont été entreprises sous l'initiative des exploitants (panneaux de signalisation, adaptation des modes de fonctionnement, adaptations du tracé et de la maintenance des pistes et chemins de randonnée d'hiver).

³ Seifert H., Westerhellweg A., Kröning J., 2003, Risk analysis of ice throw from wind turbines, Proceedings of BOREAS VI